

Сведения о выполненных работах  
в период с 01.07.2019 г. по 30.06.2020 г.

по проекту **«Моделирование активных и пассивных систем охлаждения тепловыделяющих элементов в электронике и энергетике»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 17-79-20141

Руководитель: д-р физ.-мат. наук Шерemet Михаил Александрович

В результате реализации этапа настоящего проекта были разработаны современные математические модели, описывающие нестационарные режимы переноса массы, импульса и энергии как ньютоновских, так и неньютоновских сред в замкнутых и полукоткрытых (канального типа) пространственных областях при наличии локальных тепловыделяющих элементов как конечных размеров с внутренним объемным тепловыделением, так и плоских с учетом реализации теплового граничного условия второго рода (задана плотность теплового потока на поверхности источника), в условиях влияния пористых вставок и теплопроводных элементов реберной структуры. Отдельно реализованы математические модели, описывающие как нестационарное тепловыделение внутри локального источника энергии, так и конвективно-радиационный теплоперенос жидкости с переменной вязкостью внутри каналов различной геометрии.

Все разработанные математические модели были сформулированы в преобразованных переменных. Так для описания пространственных режимов тепломассопереноса использовались два набора переменных – «векторный потенциал – вектор завихренности» для моделирования процессов конвективного теплопереноса в замкнутых областях и «вектор скорости – вектор завихренности» для исследования режимов смешанной конвекции в полукоткрытых областях (каналах). В случае решения двумерных задач математические модели были сформулированы на основе преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Для математического описания механизма переноса излучения использовалась диффузионная модель Росселанда. Для реализации построенных математических моделей были адаптированы численные методы, созданы алгоритмы и программы численного решения сформулированных нестационарных краевых задач. Проведено численное моделирование основных закономерностей гидродинамики и теплопереноса в сформулированных постановках.

В результате моделирования гидродинамики и теплопереноса в кубической полости, заполненной материалом с изменяемым фазовым состоянием, при наличии реберной структуры и тепловыделяющего элемента было установлено, что наличие ребрения на металлическом профиле способствует рассеиванию тепла в большем объеме за счет повышения площади соприкосновения с материалом. Плавление начинается с образования расплава на поверхности радиатора. На боковых стенках ребер образуются нагретые восходящие потоки таким образом, что на верхних площадках ребер наблюдаются максимальные градиенты температуры.

При проектировании активной системы охлаждения в условиях проточного тракта и тепловыделяющего элемента, расположенного заподлицо с основанием канала, возможно использование реберной структуры. Проведенные исследования показали, что с ростом скорости потока во входном сечении канала наблюдается существенное снижение средней температуры источника энергии. При этом наибольшее уменьшение средней температуры нагревателя происходит при увеличении числа Рейнольдса в диапазоне от 200 до 500. Дальнейший рост  $Re$  также приводит к снижению средней температуры, но уже не в таких масштабах.

При рассмотрении задачи естественной конвекции в замкнутом кубическом пористом объеме при наличии тепловыделяющего элемента конечных размеров на начальном этапе развития температурных полей было показано влияние чисел Рэлея и Дарси. В частности, увеличение мощности источника энергии проявляется в интенсификации течения и в смещении ядра сложной тороидальной структуры в вертикальном направлении. При этом очень интересно распределение температуры внутри объема – при малом числе Рэлея конвективное течение является достаточно слабым и за счет теплопроводности наблюдается очень слабый эффект охлаждения источника энергии, с ростом же числа Рэлея происходит формирование устойчивого теплового факела над нагревателем, что приводит к интенсивному теплоотводу в вертикальном направлении, где происходит разворот потока и теплоъем за счет охлаждающего эффекта от вертикальных поверхностей. С ростом числа Дарси наблюдаются похожие эффекты, поскольку число Дарси можно рассматривать как безразмерную проницаемость среды.

В случае течения хладагента в горизонтальном канале при наличии тепловыделяющего элемента и пористой вставки над ним установлено, что при малых числах Рейнольдса, вследствие превалирования естественно-конвективного течения над источником над внешним вынужденным потоком, наблюдается формирование возвратного течения в верхней части канала перед пористой вставкой, что отражает взаимодействие температурного поля со стороны источника энергии и фронта низкой температуры хладагента. Также следует отметить, что при прохождении хладагента через пористую вставку его температура увеличивается, что иллюстрирует равномерный теплоотвод. С ростом скорости потока на входе в канал интенсивность теплоотвода с поверхности тепловыделяющего элемента растет. При высоких скоростях потока на входе в канал в зависимости средней температуры источника от времени заметно появление локального максимума, что характеризует тепловой инерционный запас внешнего потока, а именно, его способность отводить более высокие тепловые потоки с поверхности нагревателя. При этом, как и ожидалось, рост числа Рейнольдса приводит к снижению средней температуры источника энергии. Влияние числа Дарси дополняет отмеченные особенности. Малые значения этого параметра характеризуют низкую проницаемость пористой вставки, что проявляется в существенном торможении внешнего потока хладагента и менее эффективном теплоотводе от источника энергии. В случае же высоких значений проницаемости среды средняя температура источника энергии существенно снижается.

Отдельно был проведен ряд исследований сопряженных режимов конвективного теплопереноса в замкнутых двумерных областях при наличии внутренних теплопроводных блоков. Рассматривались задачи естественной конвекции в двухсвязных областях. Основной сложностью при решении таких задач в преобразованных переменных является определения значения функции тока на поверхности внутреннего элемента, не связанного с основной границей. В рамках настоящего исследования был разработан алгоритм определения значений функции тока на поверхности внутренних объектов применительно к задачам конвективного теплопереноса. Этот алгоритм был апробирован на модельных задачах и применен для исследования гидродинамики и теплопереноса в дифференциально-обогреваемых чистых и пористых областях. В результате проведенных исследований установлено, что переход от адиабатического внутреннего блока к высокотеплопроводному варианту проявляется в снижении среднего числа Нуссельта. Размер внутреннего блока, помещенного в середине полости, имеет немонотонное влияние на среднее число Нуссельта.

При рассмотрении нестационарной сопряженной задачи естественной конвекции неньютоновской степенной жидкости внутри кубической полости с тепловыделяющим элементом на начальном временном этапе показано отсутствие влияния показателя поведения жидкости на интенсивность теплосъема. При этом заметно изменение поля температуры, а именно, в случае псевдопластической жидкости ( $n = 0.8$ ) наблюдается более интенсивный прогрев полости за счет уменьшения вязкости среды с ростом скорости деформации. Также показана эволюция температурного поля, отражающая формирование конвективной колонки и «поджатие» внутреннего столба этого течения.

При рассмотрении смешанной конвекции степенной жидкости в канале также показана эволюция теплового поля, отражающая возможности теплосъема. При этом установлено, что сформированный во входном сечении горизонтальный поток полностью сносит тепловой факел, образующийся над тепловыделяющей площадкой. При этом по мере увеличения продольной координаты канала заметно расширение формирующегося теплового пограничного слоя. С ростом времени заметно небольшое изменение в распределениях, отражающее достаточно быстрое установление процесса. Увеличение скорости на входе в канал, как и ожидалось, приводит к снижению средней температуры источника энергии, при этом установление происходит очень быстро, что, по всей видимости, обусловлено рассматриваемой формой источника энергии и влиянием псевдопластической жидкости.

В случае моделирования свободноконвективного плавления материала с изменяемым фазовым состоянием внутри замкнутой полости с радиаторной системой и локальным источником с нестационарным объемным тепловыделением было показано, что увеличение периода колебаний плотности объемного тепловыделения источника энергии проявляется в уменьшении локального минимума средней температуры внутри этого элемента, при этом длительный нагрев приводит к росту локального максимума средней температуры источника энергии. В свою очередь рост

частоты колебаний плотности объемного тепловыделения источника энергии приводит к нелинейному изменению амплитуды колебаний средней температуры внутри тепловыделяющего элемента. К тому же длительный период осцилляций проявляется в формировании более устойчивых гидродинамических структур.

Проведено математическое моделирование нестационарных режимов смешанной конвекции и теплового излучения жидкости с зависящей от температуры вязкостью в горизонтальном канале и в канале с каверной. Исследование теплового излучения проведено в рамках диффузионного приближения (модель Росселанда). В результате проведенных исследований установлено, что увеличение параметра изменения вязкости проявляется в снижении средней температуры источника энергии. Рост радиационного параметра иллюстрирует повышение средней температуры нагревателя, а увеличение числа Рейнольдса позволяет снизить рабочую температуру тепловыделяющего элемента. Таким образом, наиболее эффективное охлаждение может быть достигнуто за счет оптимального выбора расхода хладагента, а также рабочей среды.